

Micro Accelerometer Reliability in Shock Environment *

GAO Jian-fei, XIONG Ji-jun*, GUO Tao, FAN Bo

(Key Laboratory of the Electronic Measurement Technology of the National Defense, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: Micro accelerometer is used to sense the acceleration of the object and provide velocity and displacement information. Micro accelerometer combines with micro gyroscope that can be used as an element of micro inertia measurement. But the reliability issues of the micro accelerometer impact the accelerometer go to the market. Micro accelerometer could experience the shock in fabrication, package, transportation and application. Piezoresistive micro accelerometer reliability in shock environment is studied. By simplify the structure of the accelerometer, obtaining the stress distribution on the cantilever. The reliability experiment is designed, obtaining the main failure modes and failure mechanisms of micro accelerometer in shock environment. The main failure modes of the micro accelerometer in shock environment are fracture of the cantilever and the wire bond shearing.

Key words: micro accelerometer; reliability; shock; failure mode

EEACC:7230;7320E

微加速度计在冲击环境下的可靠性研究 *

高健飞,熊继军*,郭涛,范波

(中北大学电子测试技术国家重点实验室,太原 030051)

摘要: 微加速度计用于测量载体的加速度,并提供相关的速度和位移信息。微加速度计可以和微型陀螺仪组合构成微型惯性测量单元。但是微加速度计还没有完全实现市场化,微加速度计的可靠性问题已经成为制约其广泛应用的关键因素。微加速度计在加工、封装、运输和实际使用中都可能受到冲击的作用。主要研究压阻式微加速度计在冲击环境下的可靠性问题。通过简化加速度计的结构,得出了悬臂梁上的应力分布。设计了微加速度计在冲击环境下的可靠性试验,分析了加速度计在冲击环境下的主要失效模式及失效机理。得出了压阻式加速度计在冲击环境下的主要失效模式是键合引线的脱落和悬臂梁的断裂。

关键词: 微加速度计;可靠性;冲击;失效模式

中图分类号:TP202;TP212.12

文献标识码:A

文章编号:1004-1699(2008)02-0233-04

硅微加速度计是继微压力传感器之后第二个进入市场的微机械传感器,它可用于测量载体的加速度,并提供相关的速度和位移信息。硅微加速度计可以和微型陀螺仪组合构成微型惯性测量单元,用于战术武器、智能炮弹的制导系统,微小卫星的测控系统,以及汽车、机器人等的测控系统中。一方面,微加速度计具有许多传统加表所不具有的特点;另一方面,它又在技术成熟度上无法和传统加表相比拟^[1-2]。MEMS是集微型精密机械、微电子学、半导体集成电路工艺等新技术于一身的世界前沿性新技

术,基于MEMS技术的微加速度计具有体积小、重量轻、可批量制造、成本低、一致性高以及可与IC集成等突出特点;但同时,MEMS技术还远未成熟,与之相类似,微加速度计的制造和设计也远未标准化^[3-4]。往往一类微加速度计的设计和生需要依赖设计工程师和工艺工程师的通力合作,而不能像IC设计那样做到标准化^[5]。

微加速度计在加工、封装、运输和实际使用中都可能受到冲击的作用^[6]。对微加速度计在冲击环境条件下的可靠性研究的目的:1)研究微加速度计在

基金项目:国家自然科学基金资助(50775209,E052502)

收稿日期:2007-09-30 修改日期:2008-01-08

冲击环境下的失效机理,建立微加速度计在冲击环境下的失效模型,为避免微加速度计发生失效,提高其可靠性提供理论依据;2) 确定微加速度计在冲击环境中工作时发生失效的规律,作为使用规范的依据。

1 微加速度计的数学模型

压阻式微加速度计可简化为由弹簧、阻尼器、质量块构成的二阶单自由度振动系统^[7],如图 1 所示。根据牛顿第二定律,可以得到该单自由度二阶系统的力平衡方程式

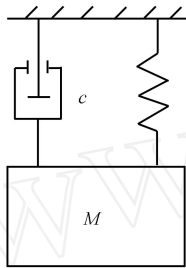


图 1 加速度传感器模型

$$M\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F(t) \quad (1)$$

其中, $M\ddot{x}$ 表示惯性力, M 为质量块的质量; $c\dot{x}$ 表示阻尼力, c 为阻尼系数; kx 表示弹性力, k 为系统的刚度系数; $F(t)$ 为加速度引起的惯性力。设阻力系数

$$= \frac{c}{2M}, \text{固有角频率 } \omega_s = \frac{k}{M}, \text{则有}$$

$$\ddot{x} + 2\zeta\dot{x} + \omega_s^2 x = KF(t) \quad (2)$$

其中, $K = \frac{1}{M}$ 。将式(2)进行拉普拉斯变换,得到系统的传递函数

$$H(s) = \frac{X(s)}{F(s)} = \frac{K}{s^2 + 2\zeta\omega_s s + \omega_s^2} \quad (3)$$

若已知加速度函数 $F(t)$, 将 $F(t)$ 进行拉普拉斯变换,得到 $F(s)$, 由此可得

$$X(s) = H(s) F(s) = \frac{K}{s^2 + 2\zeta\omega_s s + \omega_s^2} F(s) \quad (4)$$

将式(4)进行拉普拉斯逆变换,得到挠度的时域函数 $x(t)$; 根据挠度与应力之间的关系得到应力的时域函数; 由应力与电阻变化率的关系最终求得系统的输出电压函数和输出灵敏度函数等。由式(4)可知,微加速度计的系统函数与系统的固有频率、阻尼参数直接相关。

1.1 压阻式微加速度计的应力求解

本文的试验样品为八梁压阻式微加速度计。下面主要以八梁结构为例求解微加速度计梁上的应力分布。其它结构类似。加速度计的示意图如图 2 所示。

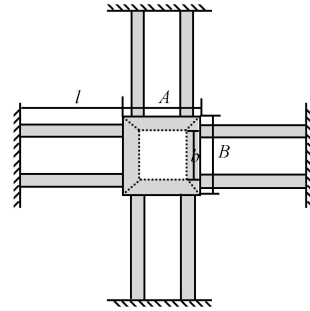


图 2 四边八梁-质量块结构

为了分析四边八梁-质量块结构的受力,对该结构进行了一系列的简化:

(1) 首先,简化四边八梁结构(如图 2 所示)为四边梁结构,四边梁结构及其受力情况如图 3 所示,其中梁的宽度为八梁结构中梁宽度的两倍;

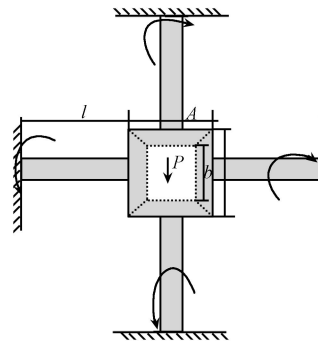


图 3 四边梁-质量块结构

(2) 由于四边梁结构在 xoy 面上具有完全对称性,因此又可简化为如图 4 所示的二梁结构;

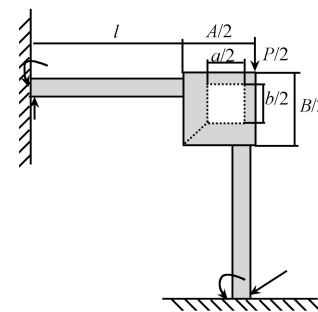


图 4 二梁结构及其受力

(3) 去掉一个多余约束,结构受力如图 5 所示;

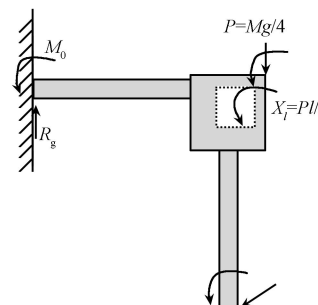


图 5 去除多余约束的受力简图

(4) 由于梁具有固支点,未约束处的弯矩对梁弯曲起的作用相对很小,可以忽略。于是四边八梁-质量块结构的受力最终可以简化为如图 6 所示。

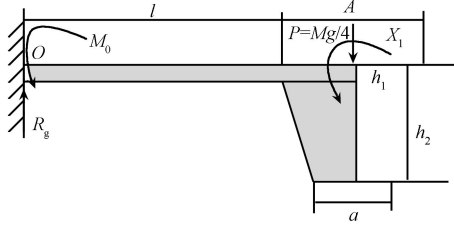


图 6 结构受力最终简化图

对于如图 7 所示的梁-质量块结构,当系统受到加速度作用时,梁上距离根部为 x 的点其挠度为

$$y(x) = -\frac{1}{6} \frac{Px^2(3l-x)}{EI} + \frac{1}{4} \frac{Px^2l}{EI} - \frac{1}{12} \frac{Px^2(3l-2x)}{EI} \quad (5)$$

式中: $P = Mg/4$ 为作用在加速度计上的外力, M 为质量块质量, kg ; l 为梁长, μm ; E 为加速度计材料的杨氏模量, MPa ; $I = wh_1^3/6$ 为梁的转动惯量, w 为梁宽 μm , h_1 为梁厚, μm 。

因此,梁端部 ($x = l$) 的挠度为

$$y_{max} = -\frac{1}{12} \frac{Pl^3}{EI} \quad (6)$$

梁上距离根部为 x 的点其应力为

$$T(x) = -E \cdot \left[\frac{h}{2} \cdot \frac{d^2 y(x)}{dx^2} \right] = -\frac{1}{4} \frac{hP(2x-l)}{I} \quad (7)$$

同理,梁端部 ($x = l$) 的应力为

$$T_{max} = -\frac{1}{4} \frac{h_1 Pl}{I} \quad (8)$$

同时可以得到梁上的最大应变

$$\epsilon_{max} = \frac{T_{max}}{E} = -\frac{1}{4} \frac{h_1 Pl}{EI} \quad (9)$$

通过对微加速度计结构的简化,得到了加速度计梁上的应力分布情况。可以为分析加速度计在受到外力作用时梁上的应力、应变和挠度等情况。

2 微加速度计的冲击试验

由于加速度计在实际使用过程中,有可能受到来自不同方向的冲击,故对加速度计进行下底面、上底面和侧面三个方向进行冲击,以更好的模拟实际的冲击环境。试验的样品是 5 个压阻式悬臂梁加速度计,是在同一批工艺下制造的,采用相同的封装工艺的八梁加速度计,如图 7 所示。

加速度计的梁尺寸:梁长 \times 梁宽 \times 梁厚 = $500 \mu m \times 300 \mu m \times 100 \mu m$;质量块尺寸:长 \times 宽 \times 厚 = $1900 \mu m \times 1900 \mu m \times 395 \mu m$ 。根据 Srikar 和

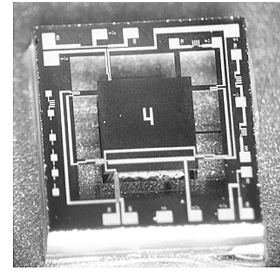


图 7 压阻式八梁加速度计实物照片

Senturia 的研究结论^[8]: MEMS 微结构在冲击下的响应由下面的三个时间常数及其关系来决定,应力波的渡越时间 A 、结构的本征振动周期 T 和冲击的持续时间。1) 当 $t < A$ 时,需要用应力波理论来分析器件的响应;2) 当 t 和 T 数值相当时,器件将发生振动;3) 大于 A 和 T 时,可以用准静态理论来分析 MEMS 结构在冲击下的响应。

应力波的渡越时间 A 为应力波从衬底传到 MEMS 器件自由端的时间

$$A = L/c \quad (10)$$

式中的 L 为冲击的作用点到器件自由端的最大距离,一般 $L < 1 \text{ mm}$ 。 $c = \sqrt{E/\rho}$ 为应力波传播速度, ρ 为密度, kg/m^3 。对于硅材料,杨氏模量为 165 GPa ,密度为 2330 kg/m^3 ,得到 c 约为 8415 m/s ,可知 A 小于 $0.1 \mu s$ 。故 MEMS 器件在冲击环境下多为准静态响应。冲击试验的大小、方向和次数如表 1 所示。

表 1 冲击的 g 值、方向和次数

冲击的 g 值/ g_n	下底面	上底面	侧面
500	8	8	8
1 000	8	8	8
2 000	7	7	7
4 000	6	6	6
8 000	4	4	4
10 000	4	4	4
20 000	3	3	3

冲击试验的波形是近似的半正弦波,如图 8 所示。这是进行 $20000 g_n$ 冲击试验时测得的波形,峰值加速度为 $21313 g_n$,持续时间为 $191 \mu s$ 。

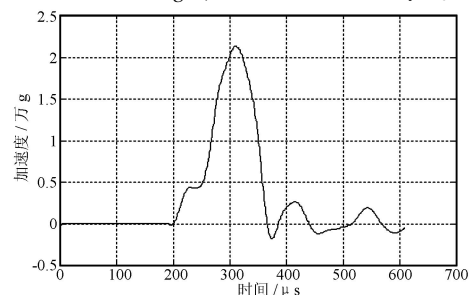


图 8 冲击波形

试验结果表明,冲击在 $500 \sim 4\,000 g_n$ 时,5 个加速度计都通过了试验;在 $8\,000 g_n$ 加速度计都通过了试验,但是有 3 个芯片中有少量的碎屑产生;在 $10\,000 g_n$ 其中有一个加速度计的键合引线脱落,芯片中碎屑略有增加;在 $20\,000 g_n$ 时有 3 个加速度计的梁发生断裂,如图 9 所示。

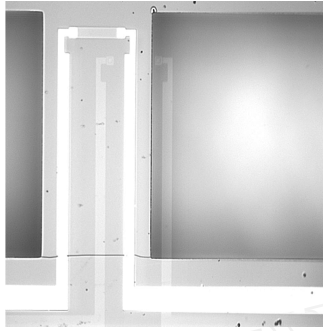


图 9 加速度计的梁发生断裂

根据(8)式的可以计算当冲击的峰值加速度为 $20\,000 g_n$ 时梁的根部受到的应力值。发现并没有超过硅材料的断裂强度 7 GPa 。由此可以说明重复性的冲击加速了硅材料的疲劳损伤,降低了材料的断裂强度。

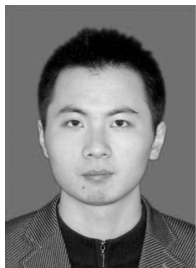
3 结论

本文通过对八梁压阻式加速度计结构的简化,得出了加速度计梁在静态载荷作用下的应力分布。通过冲击试验得出:在冲击环境下的主要失效模式是键合引线的脱落和微梁的断裂。主要原因是,加

速度计上的微电路是通过溅射铝形成的,而采用的键合引线是金,不同材料间的粘结强度不是很强,若采用铝引线将明显提高键合强度和可靠性;重复性的冲击加速了材料的疲劳,导致冲击应力还没有超过其断裂强度,加速度计的梁就发生了断裂。

参考文献:

- [1] J. A. Walraven, Failure Analysis Issues in Microelectromechanical Systems[J]. Microelectronics Reliability, 2005 (45): 1750-1757.
- [2] Danelle M. Tanner, MEMS Reliability in Shock Environments [C]// IEEE International Reliability Physics Symposium in San Jose, CA, April 10-13, 2000:129-138.
- [3] Takao Sasayama, Highly reliability silicon micromachined physical sensors in mass production[J]. Sensors and Actuators A, 1996(54): 714-717.
- [4] van Spengen W Merlijn, MEMS Reliability from a Failure Mechanisms Perspective [J]. Microelectronics Reliability, 2003(43): 1049-1060.
- [5] Brian Stark. MEMS Reliability Assurance Guidelines for Space Applications[J]. Jet Propulsion Laboratory, 1999, 2:209.
- [6] Witvrouw A. Materials Issues in the Processing, the Operation and the Reliability of MEMS[J]. Microelectronic Engineering, 2004(76): 245-257.
- [7] 张文栋. 微传感器与微执行器全书 [M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [8] Srikar V T and Senturia Stephen D. The Reliability of Microelectromechanical Systems (MEMS) in Shock Environments [J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 11 (3), JUNE 2002.



高健飞(1982-),男,硕士研究生,研究方向为微加速度计的可靠性研究, gjf_11521@163.com。



熊继军(1971-),男,现任中北大学电子与计算机科学技术学院院长,博士生导师。科研领域涉及 M/NEMS 器件的设计、MEMS 器件可靠性研究、信号调理、恶劣环境下飞行器飞行、控制及环境参数的实时测试、利用中规模电路的集成实现电子设备的智能化和集成等。近年来先后承担国家 863、国防 973 等 20 多项国家级科研与重大武器型号测试设备研制项目,研究成果应用于 20 多个国家重点和重大武器型号,取得了重大的直接经济效益和社会效益, xiongjijun@nuc.edu.cn。